



УДК 621.039

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СХЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ АЭС С РЕАКТОРАМИ НА БЫСТРЫХ И ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

ANALYSIS OF PROCESS WATER SUPPLY SCHEMES INFLUENCE ON ENERGY EFFICIENCY OF NPP WITH FAST OR THERMAL NEUTRONS NUCLEAR REACTOR

Иванков Григорий Евгеньевич, студент, каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ivankov.griha@mail.ru, Тел.: ++7(343)375-97-37

Ташлыков Олег Леонидович, кан-т. техн. наук, доцент каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: otashlykov@list.ru. Тел.: +7(343)375-97-37

Grigory Y. Ivankov, student, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ivankov.griha@mail.ru. Ph.: ++7(343)375-97-37

Oleg L. Tashlykov, Cand. Sci., Associate professor, Department «Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: otashlykov@list.ru. Ph.: +7(343)375-97-37

Аннотация: Обоснована зависимость энергоэффективности АЭС от вида первичного теплоносителя. Приведено соотношение размеров паровых турбин АЭС с реакторами на быстрых и тепловых нейтронах. Приведены результаты расчетного анализа изменения термического КПД турбоустановок, работающих на перегретом и насыщенном паре, при переходе с прямоточной на оборотную схему технического водоснабжения. Показано изменение термического КПД в зависимости от температуры окружающей среды в течение календарного года (для Белоярского водохранилища).

Abstract: The dependency of NPP energy efficiency from primary coolant type is substantiated. The ratio of dimensions of steam turbines of NPPs with fast and thermal neutron reactors is given. The results of calculation analysis of thermal efficiency changes of turbine units operating on superheated and saturated steam, during the transition from once-through to circulating technical water supply scheme are given. The change in thermal efficiency depending on the ambient temperature during the calendar year (for Beloyarsk reservoir) is shown.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, реактор на тепловых нейтронах, жидкометаллический теплоноситель, насыщенный пар, перегретый пар, градирня, коэффициент полезного действия.

Key words: fast reactor, thermal reactor, liquid metal coolant, saturated steam, superheated steam, cooler, efficiency.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в любых системах преобразования энергетических ресурсов, в которых теплота служит промежуточным энергоносителем, значительная ее часть сбрасывается в окружающую среду. Поглощение теплоты водным и воздушным бассейнами сопровождается локальными изменениями температуры, что, в свою очередь, оказывает на среду как

биологическое, так и физическое воздействие. Наиболее крупными источниками сбросной теплоты являются ТЭС и АЭС [1].

В Российской Федерации введена новая редакция Водного кодекса РФ, принятого Государственной Думой 03.06.2006 г. № 74-ФЗ, статья 60 которого запрещает проектирование прямоточных схем технического водоснабжения. В связи с этим и дальнейшим развитием атомной

энергетики, в частности с планами по строительству энергоблока №5 Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-1200, были проведены расчетные исследования по влиянию на энергоэффективность АЭС вида схемы технического водоснабжения (водохранилище и градирня) в течение года. Для сравнения аналогичные расчеты были выполнены для энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, использующего турбину, работающую на насыщенном паре.

ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АЭС ОТ ВИДА ПЕРВИЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Технологический цикл АЭС с реакторами на тепловых нейтронах с водным теплоносителем обладает следующими особенностями [2]:

- выбор давления в первом контуре реакторов большой мощности (≈ 16 МПа) связан с ограничением по температуре, равном 350°C , для оболочек ТВЭЛ из циркониевых сплавов. Отсюда следует, что предельная температура пара во втором контуре не может превысить 315°C в случае его перегрева. Выбор циркониевого сплава для оболочек ТВЭЛ и повышение единичной мощности энергоблоков предопределили термодинамические параметры АЭС: давление первого контура около 16 МПа, температура теплоносителя на выходе из реактора $320\text{--}330^\circ\text{C}$; давление и температура пара во втором контуре соответственно 6,3–7,2 МПа и $279\text{--}285^\circ\text{C}$;
- высокая мощность турбоустановок достигается большими расходами пара, что влияет на потери тепловой энергии в конденсаторе паровой турбины. Повышенные невосполнимые потери теплоты в холодном источнике снижают экономичность работы таких энергоблоков, поэтому КПД_{брутто} современных АЭС с реакторами на тепловых нейтронах, как правило, не превышает 32–35 %.

В реакторах на быстрых нейтронах (РБН) в качестве теплоносителя используют жидкие металлы, позволяющие отводить значительные удельные тепловыделения. В настоящее время практически во всех энергетических РБН используют жидкий натрий, температура которого на выходе из активной зоны составляет порядка 550°C (температура кипения натрия 878°C). Это позволяет вырабатывать в парогенераторах перегретый пар высоких параметров ($p=13$ МПа, $t=505^\circ\text{C}$), что повышает термодинамическую эффективность АЭС, и их коэффициент полезного действия превышает 40 % [3].

Система с РБН с натриевым теплоносителем и замкнутым ядерным топливным циклом (ЯТЦ) входит в перечень предлагаемых ядерных энергетических систем четвертого поколения, обладающих повышенными показателями в

области обеспечения устойчивого развития, конкурентоспособности, безопасности и надежности, а также защиты от распространения ядерного оружия [4].

В реальных схемах турбин насыщенного пара широко используется промежуточный перегрев пара после достижения им предельно допустимой влажности. Значительное превышение энтальпии поступающего на турбину перегретого пара над насыщенным, уменьшает потребный расход пара для выработки одной и той же мощности при одинаковых давлениях в конденсаторах турбин. Соответственно, при использовании АЭС с РБН снижаются тепловое загрязнение окружающей среды через охлаждающую конденсаторы турбин воду [5]. Это определяет более высокий по сравнению с турбинами, работающими на насыщенном паре, КПД.

На рис. 1, в качестве примера, показано соотношение размеров турбин, работающих на перегретом (К-210-130, К-500-16,7) и насыщенном (К-220-44, К-500-60, К-500-65) паре. Заметим, что паровая турбина К-500-16,7 (давление свежего пара указано в МПа) предназначена для работы в составе блока АЭС «Калпакам» (Индия) с реакторной установкой на быстрых нейтронах (PFBR) [2].

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АЭС

При проведении анализа изменения термического КПД в течение календарного года для турбоустановок, работающих на перегретом и насыщенном паре, при переходе с прямоточной на оборотную схему технического водоснабжения, были выполнены расчеты для турбин К-210-130, работающих в составе энергоблока с реактором БН-600 и К-1000-60/1500 АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Для корректности результатов анализа давление в конденсаторе и температуры циркуляционной воды на входе в конденсатор для обоих типов турбин взяты одинаковыми. Расчеты проведены для двух схем снабжения конденсаторов турбин охлаждающей водой – с использованием Белоярского водохранилища и градирни. В приведенном варианте расчета использованы данные среднемесячных значений температуры воды в Белоярском водохранилище за 2014 г. При этом максимальное значение температуры воды на входе в конденсатор составило $19,2^\circ\text{C}$ (август), минимальное – $3,2^\circ\text{C}$ (ноябрь).

При расчетах не учитывались отборы пара на теплофикационную установку.

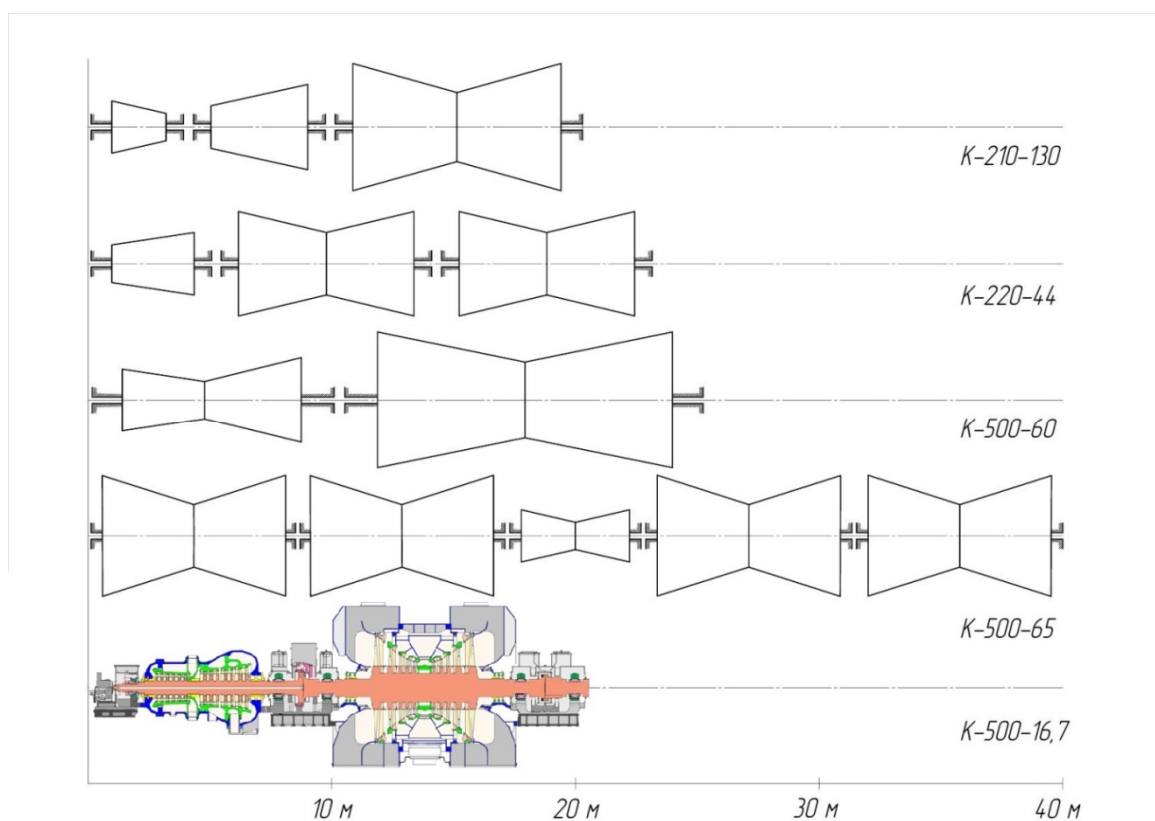


Рис. 1. Соотношение размеров турбин, работающих на перегретом и насыщенном паре

На рис. 2 приведены результаты расчетного анализа изменения термического КПД турбоустановки K-210-130, работающей в составе энергоблока АЭС с реактором БН-600.

Для сравнительной оценки изменения энергоэффективности энергоблоков АЭС с реакторами на быстрых и тепловых нейтронах при

переходе с прямоточной на оборотную систему водоснабжения основных конденсаторов турбин, работающих на перегретом и насыщенном паре был проведен анализ изменения располагаемых теплоперепадов для трех характерных месяцев (май, август, ноябрь) 2014 г. (рис.3).

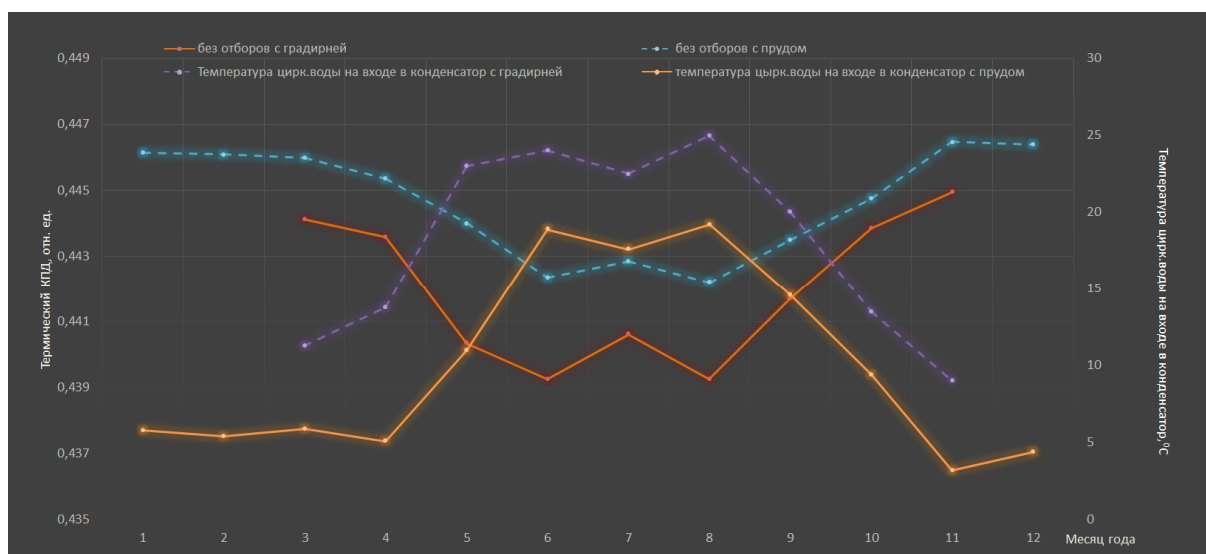


Рис.2. Изменение термического КПД турбоустановки K-210-130 в зависимости от используемых схем охлаждения основных конденсаторов турбин

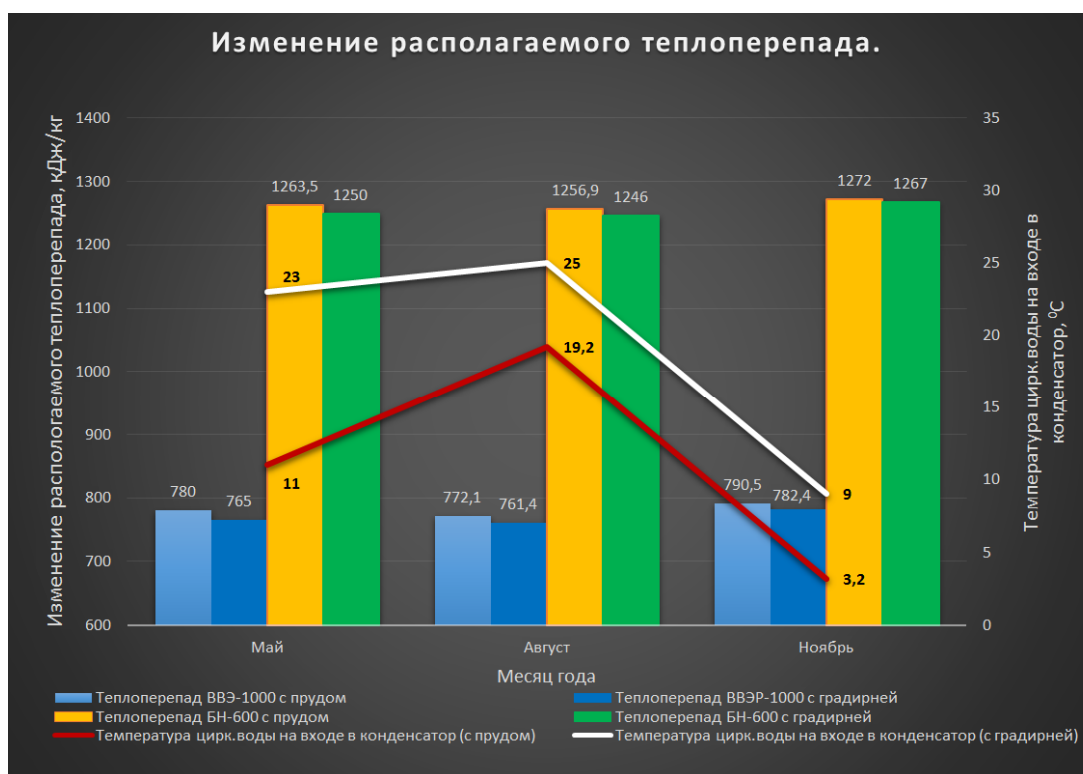


Рис. 3. Зависимость располагаемого теплоперепада для турбин, работающих на насыщенном и перегретом паре, от схемы технического водоснабжения и температуры охлаждающей воды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для турбин К-210-130, работающих на перегретом паре (АЭС с БН-600), снижение располагаемого теплоперепада при переходе на систему охлаждения циркуляционной воды с помощью градирен составляет 0,44...1,07 %, а для турбины К-1000-60, работающей на насыщенном паре (АЭС с ВВЭР-1000) – 1,02...1,83 % (рис. 4).

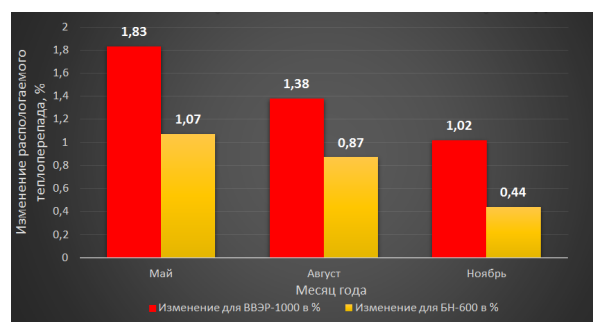


Рис. 4. Изменение располагаемого теплоперепада на турбоустановках энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и БН-600 при переходе с проточного на обратное водоснабжение

Это различие определяется тем, что в турбинах перегретого пара на высоких параметрах срабатывается основная часть располагаемого теплоперепада.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дэвинс Д. Энергия. М.: Энергоатомиздат, 1985. 360 с.
2. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Дубинин А.М. Повышение энергоэффективности АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2015. № 4. С. 15-25.
3. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяков, О.Л. Ташлыков, Г.П. Титов, А.М. Тучков, С.Е. Щеклеин; под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 548 с.
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Экологическое прогнозирование в ядерной энергетике XXI века // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 8-9 (172-173). С. 50-58
5. Носов Ю.В., Смышляева О.Ю., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Обеспечение экологической безопасности при длительной эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах на примере Белоярской АЭС // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2012. №4. С.64-68